

Optimización de la localización de actividades en función de minimizar el consumo eléctrico en la región metropolitana de Barcelona

Report de recerca N° 6

Jorge Cerda Troncoso

Junio 2010

Problema de investigación

En el marco de la modelación de la eficiencia ambiental y energética de la funcionalidad territorial de la región metropolitana de Barcelona, se enfrentó la problemática de modelar el consumo energético de las distintas actividades localizadas en el territorio. Para ello, en otros trabajos, se calibraron distintos modelos econométricos con la estructura tradicional de los modelos de producción (Cobb Douglas).

El entender el fenómeno de consumo eléctrico como un proceso de producción surge pues una actividad específica “produce” una demanda de electricidad, la cual es instantáneamente satisfecha por el sistema, registrándose esto como un consumo.

Producto del enfoque anterior es que se tienen una serie de ecuaciones (no lineales) que predicen el consumo energético de un municipio en base a las superficies construidas por cada actividad, a las condiciones meteorológicas preferentemente de verano, y a condiciones de usos de las distintas actividades por parte de la población (tiempo de desarrollo de ciertas actividades).

El problema que enfrenta el presente trabajo es el de identificar el ordenamiento de las actividades (superficies construidas) generadoras de consumo eléctrico, en los distintos municipios de la región metropolitana de Barcelona, de manera de hacer mínimo el consumo eléctrico total. Dicho de otra forma, como se tendrían que reordenar las superficies de las actividades, considerando las variables meteorológicas y funcionales de los municipios, de modo que generaran el menor consumo eléctrico posible.

Objetivos

Por lo planteado, el objetivo de este trabajo es determinar el ordenamiento de actividades que minimiza el consumo eléctrico total de la RMB, para posteriormente compararlo con la situación actual, desde un enfoque de lógica urbana.

Metodología

El trabajo contempla dos etapas de desarrollo metodológico. La primera tiene que ver con determinar el ordenamiento óptimo de las actividades en los municipios de la RMB, y la segunda con analizar y evaluar la lógica urbana de dicho ordenamiento óptimo.

A continuación se presenta en detalle la metodología seguida en cada etapa.

Ordenamiento óptimo

El problema que se enfrenta, se enmarca en la línea matemática de investigación de operación, y dada la estructura de los modelos matemáticos calibrados, en la línea de optimización no lineal.

Los modelos de consumo eléctrico calibrados tienen la siguiente estructura:

$$C_{i,j} = e^{(\beta_0 + \sum_k \beta_k * V_{k,i,j})} * S_{i,j}^{\alpha_i} \quad (1)$$

Donde

$C_{i,j}$: consumo eléctrico de la actividad i en el municipio j

$S_{i,j}$: superficie construida (m²) de la actividad i en el municipio j

$V_{k,i,j}$: variable meteorológicas y/o funcional k , para la actividad i en el municipio j

β_0 : término constante

β_k : coeficiente que acompaña a cada variable meteorológica/funcional

α_i : parámetro que representan el cambio porcentual en el consumo eléctrico al variar en uno por ciento la superficie construida de la actividad i

El problema de optimización que se planteó hace los siguientes supuestos:

- 1.- La superficie a repartir de cada actividad, en la RMB, es constante
- 2.- La superficie construida de cada municipio es constante

Con estos supuesto, el problema se transforma en un problema de distribución de superficies de suelo, conocidos tanto los totales por municipios, como por actividad, minimizando la suma del total de consumo eléctrico por actividad y municipio, según la ec (1). La formulación matemática del modelo de optimización tiene la siguiente estructura.

$$\text{Min } Z_{S_{i,j}} = \sum_{i,j} e^{(\beta_0 + \sum_k \beta_k * V_{k,i,j})} * S_{i,j}^{\alpha_i} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_i S_{i,j} = S_j ; \sum_j S_{i,j} = S_i$$

Como ya se mencionara antes, el problema es un problema de optimización no lineal (en los parámetros), por lo que su resolución no es simple. Uno de los métodos utilizados en la resolución de este tipo de problema es la generación de distintas alternativas de distribución de las superficie de actividades (que cumplan las restricciones), para posteriormente evaluar cada una con la función objetivo (costo total). Uno de los problemas de estos métodos heurísticos es (del tipo "planos de corte") algunas veces no aseguran la obtención de una solución óptima global (sólo logran óptimos locales).

Analizando la estructura del problema planteado, el problema original se puede asimilar al clásico problema de optimización entera conocido como "problema de transporte", en donde se minimiza el costo total de un sistema de transporte, conocidos los viajes que salen, los viajes que llegan, y una matriz de costos unitarios de interacción. Por lo anterior, la generación de distintas alternativas de ordenamiento (cumpliendo las restricciones) se realizó en base a la resolución de este problema con distintas matrices de costos unitarios (obtenidas del análisis de consumo marginal eléctrico, para distintos umbrales de superficie por actividad y municipio).

Lógica urbana de los ordenamientos

La lógica urbana es un término complejo de definir, y más de cuantificar. Dado que este no es el objetivo de este trabajo, para analizar la relación locacional de las actividades en la RMB se calculó la matriz de coeficientes de correlación lineal (pearson) entre las superficies construidas por municipio/actividad. Este coeficiente mide, en este caso, la asociación espacial de la superficie construida entre pares de actividades (por lo que conforma una matriz).

El coeficiente de correlación lineal puede tener un valor que va entre -1 y 1. El valor -1 indica una relación inversa entre las variables, es decir y para nuestro caso, indica que donde existe superficie construida de una actividad determinada, no existe superficie construida de otra actividad. Si el valor del coeficiente es 0, no existe un patrón reconocible en el ordenamiento de las superficies en los municipios. Finalmente si el valor es 1 se tiene que donde existe superficie construida de una actividad, también existe superficie construida de la otra actividad (y en iguales proporciones).

Vista así, esta matriz nos entrega valores de asociaciones positivas y negativas, cuyos valores son sumables entre sí. La suma indicaría la asociación espacial del total de actividades en el total de municipios analizados. Así, si el valor suma es positivo, indicaría una coexistencia municipal de las actividades, y si fuese negativo una no coexistencia municipal de las actividades.

Resultados

A continuación se muestran los valores de superficies construidas, consumo eléctrico, y asociación urbana de la RMB al año 2001 (año de calibración de los modelos de consumo eléctrico).

Tabla 1.- Situación base de la RMB en relación a superficie construida y consumo eléctrico, por rama de actividad modelada

Actividad	Kwh total año 2001 *	%	Superficie catastro año 2001 (m2)	%
Residencias	5.792.747.971	31,3	257.597.812	64,2
Industria	7.030.724.574	38,0	57.126.766	14,2
Comercio	2.159.251.967	11,7	23.469.345	5,9
Servicios	415.165.810	2,2	22.553.418	5,6
Transporte	764.144.468	4,1	21.190.966	5,3
Educación	101.702.346	0,5	7.909.588	2,0
Hotelería	426.138.862	2,3	4.843.349	1,2
Sanitaria	666.538.743	3,6	3.500.726	0,9
Financieras	217.414.542	1,2	1.504.748	0,4
Administración	218.896.512	1,2	1.399.358	0,3
Alumbrado público	705.920.396	3,8		
Total	18.498.646.190	100,0	401.096.076	100,0

* estimado por los modelos econométricos calibrados

De la tabla se puede apreciar la disimilitud que existe entre el peso porcentual de las distintas actividades tanto en la superficie construida como en el consumo eléctrico. Por ejemplo, la superficie residencial que representa un 64%, sólo origina un 31% del consumo eléctrico. Pero la actividad industrial que representa un 14% de la superficie, origina un 38% del consumo. Algo similar ocurre en la actividad comercial. Lo anterior, y la restante información de la tabla, indican la variabilidad de las tasas de consumo eléctrico por actividad, lo que sustenta de alguna manera la preocupación que aborda el presente trabajo.

La coexistencia espacial de las actividades, genera los valores presentados en la tabla 2.

Tabla 2.- Correlación espacial entre actividades, a nivel de municipios de la RMB

	Residencias	Administración	Comercio	Educación	Financieras	Hotelería	Industria	Sanitaria	Servicios	Transporte
Residencias	1	0,985	0,998	0,994	0,980	0,856	0,901	0,996	0,975	0,964
Administración		1	0,984	0,984	0,991	0,859	0,867	0,985	0,971	0,948
Comercio			1	0,992	0,977	0,857	0,913	0,995	0,971	0,964
Educación				1	0,982	0,850	0,890	0,992	0,972	0,956
Financieras					1	0,875	0,845	0,980	0,966	0,933
Hotelería						1	0,725	0,849	0,849	0,809
Industria							1	0,893	0,868	0,883
Sanitaria								1	0,978	0,956
Servicios									1	0,949
Transporte										1
Indicador de coexistencia de actividades										41,9105

De la tabla se aprecia el alto grado de coexistencia espacial entre las superficies construidas de las distintas actividades analizadas (correlaciones cercanas a 1), y además no existen valores negativos. Lo expuesto se refrenda en el alto valor (41,9) del indicador construido para el análisis. Es necesario recordar que el indicador es la suma de la matriz triangular superior presentada.

De la aplicación del modelo de optimización, y de su método de resolución en base a la generación de escenarios alternativos, surgieron aproximadamente 15 escenarios distintos, donde lo único que cambiaba era la distribución de las superficies por actividad/municipio, manteniéndose constantes el total por actividad, y el total por municipios. Cada uno de estos escenarios genera un consumo total, y por actividad para la RMB. A continuación se presentan (tabla 3) sólo los escenarios cuyo consumo total resulto estar por debajo del la situación base (criterio de eficiencia energética).

Tabla 3.- Escenarios de optimización del consumo eléctrico total y por actividad para la RMB

Actividad	Consumo anual (Kwh)										
	Total	Industria	Residencias	Comercio	Transporte	Sanitaria	Hotelería	Servicios	Administración	Financieras	Educación
Situación base	18.498.646.190	7.030.724.574	5.792.747.971	2.159.251.967	764.144.468	666.538.743	426.138.862	415.165.810	218.896.512	217.414.542	101.702.346
Esc. 1	17.650.601.328	8.471.692.306	5.814.121.104	1.120.343.625	98.600.403	349.252.700	38.683.952	803.300.996	48.980.868	131.822.532	67.882.448
Esc. 2	17.532.182.192	8.051.069.142	5.841.145.517	1.128.227.024	104.450.122	422.720.499	34.100.164	1.009.454.241	32.074.992	131.822.532	71.197.564
Esc. 3	16.688.888.990	7.917.183.879	5.965.328.081	1.132.390.184	103.275.759	349.252.700	35.855.195	257.219.337	12.237.805	131.822.532	78.403.122
Esc. 4	15.729.396.747	6.845.503.872	6.053.423.558	1.168.391.363	97.501.351	393.072.091	11.913.767	233.561.532	10.988.179	132.224.786	76.895.852
Esc. 5	15.418.935.451	6.518.218.959	6.077.543.078	1.166.567.941	98.748.027	393.072.091	17.404.341	231.661.511	9.652.867	126.809.229	73.337.012
Esc. 6	15.287.495.316	6.470.633.703	6.077.243.976	1.152.072.724	107.829.474	349.252.700	44.385.011	166.594.775	10.886.051	132.224.786	70.451.720
Esc. 7	15.337.461.116	6.450.216.662	6.079.370.410	1.163.549.990	108.164.554	395.216.343	48.010.069	173.450.134	10.886.051	132.224.786	70.451.720
Esc. 8	15.331.417.141	6.450.216.662	6.079.231.078	1.193.749.861	116.067.622	349.252.700	50.187.222	173.631.298	10.886.051	131.822.532	70.451.720
Esc. 9	15.326.327.717	6.445.948.604	6.084.313.228	1.195.149.272	116.148.574	349.252.700	43.860.751	172.171.636	10.886.051	132.224.786	70.451.720
Esc. 10	15.327.256.214	6.445.948.604	6.084.344.799	1.193.009.056	117.136.596	349.252.700	48.155.026	169.926.481	10.886.051	132.224.786	70.451.720
Esc. 11	15.384.865.345	6.445.948.604	6.063.470.159	1.230.544.705	160.170.998	349.252.700	50.027.488	165.967.738	10.886.051	132.224.786	70.451.720
% optimo	-17,4	-8,3	0,4	-48,1	-87,2	-47,6	-97,2	-60,0	-95,6	-41,7	-33,3
% optimo total	-17,4	-8,0	4,9	-46,6	-85,9	-47,6	-89,6	-59,9	-95,0	-39,2	-30,7

En la tabla se muestran los valores totales obtenidos para la RMB en los distintos escenarios considerados. En la columna de total se puede ver que es el escenario 6 en donde se alcanza el menor valor, que como también se indica en la columna, representa una reducción del 17,4% del consumo total en la situación base. Es decir, con el reordenamiento del total de superficie construida, sólo se puede llegar a reducir el 17,4% del consumo eléctrico en la RMB.

Como también se puede ver en la tabla, la situación óptima del consumo total no coincide con los óptimos por cada una de las actividades. Por ejemplo, para la industria el escenario óptimo es el 11, con una reducción de un 8,3% respecto de la situación base. Para la residencia no existe un escenario óptimo, ya que todos los escenarios aumentan el consumo en comparación con la situación base (por lo que la situación base sería su óptimo). Para el comercio el escenario óptimo es el 1, con un 48% de reducción. Y así se puede ver lo que ocurre en las restantes actividades.

Cuando se elige el escenario 6 como óptimo (con la lógica del consumo total), se logran las reducciones presentadas en la última fila de la tabla 3. Los valores de esta última fila son similares a sus óptimos particulares, sólo la residencia aumenta significativamente su consumo en relación a la situación base. Pero finalmente, todos los efectos particulares se resumen en la disminución del 17% del consumo total.

En la tabla 4 se presentan los valores del indicador de coexistencia de actividades, en relación a los consumos totales.

Tabla 4.- Situación base de la RMB en relación al consumo total y a la coexistencia espacial de las actividades

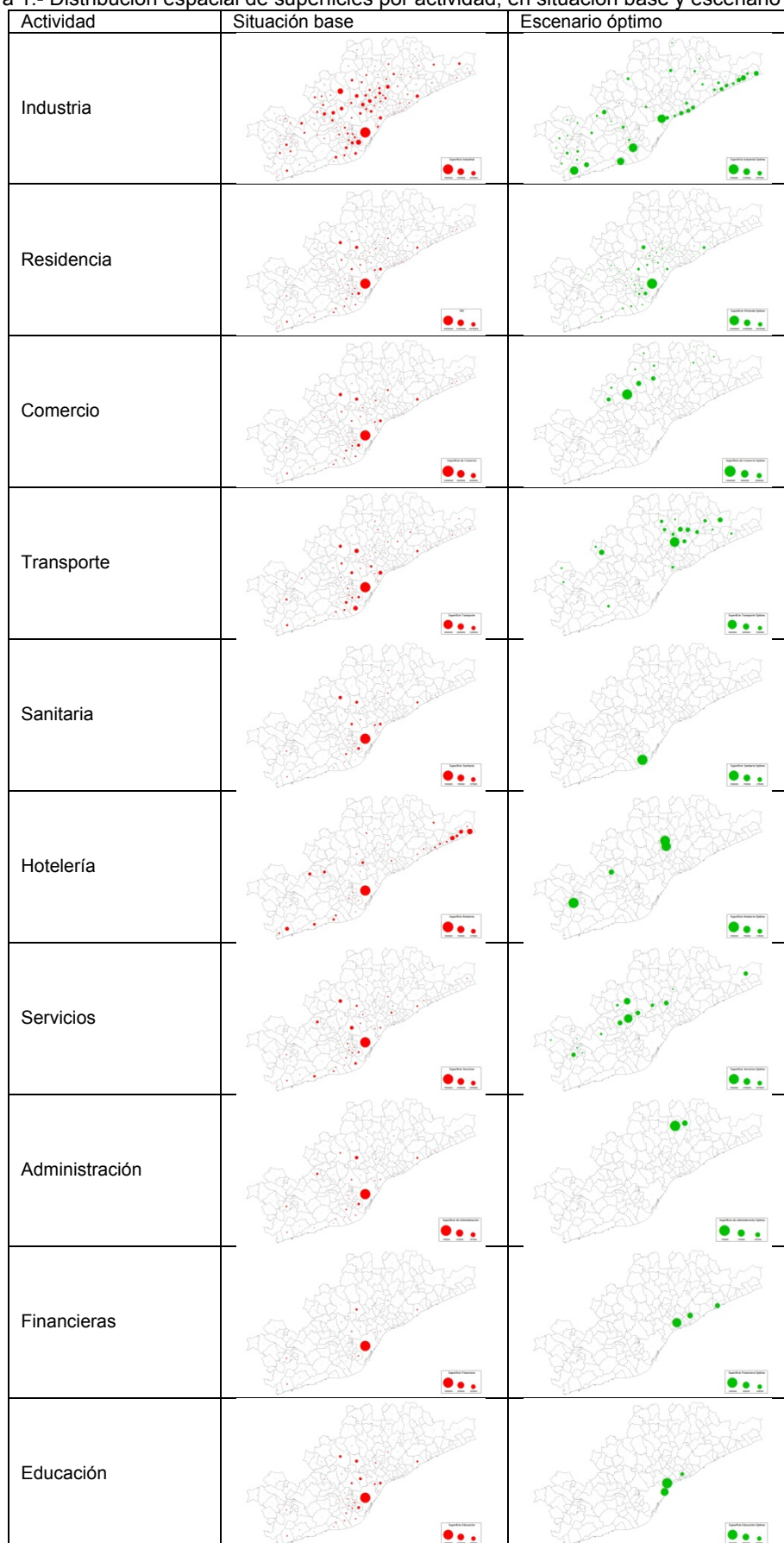
Actividad	Consumo anual (Kwh)	Indicador de coexistencia de actividades
	Total	
Situación base	18.498.646.190	41,9105
Esc. 1	17.650.601.328	1,5403
Esc. 2	17.532.182.192	1,5403
Esc. 3	16.688.888.990	-0,0894
Esc. 4	15.729.396.747	-0,0894
Esc. 5	15.418.935.451	0,1716
Esc. 6	15.287.495.316	-0,4483
Esc. 7	15.337.461.116	-0,3145
Esc. 8	15.331.417.141	-0,4402
Esc. 9	15.326.327.717	-0,4960
Esc. 10	15.327.256.214	-0,5006
Esc. 11	15.384.865.345	-0,4037

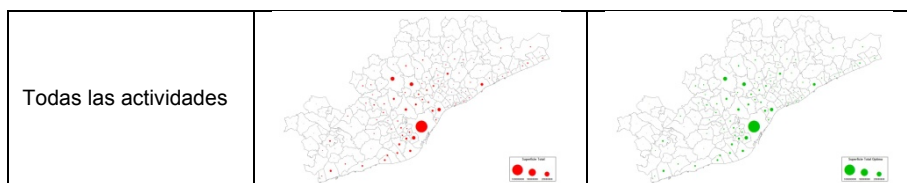
Como se aprecia en la tabla, ningún ordenamiento óptimo se acerca al nivel de coexistencia de la situación base de las actividades. Lo anterior era de esperarse, en el sentido que la optimización realizada no contempla restricciones de coexistencia, luego los resultados tienden a especializar los municipios en una sola actividad (para la cual su consumo eléctrico es mínimo). Es así que el resultado del indicador para el escenario óptimo (6) es negativo, por lo que se rompe la coexistencia de las actividades de la situación base.

Cabe mencionar que si se incorporaran restricciones de coexistencia, el óptimo a lograr generaría una reducción menor del 17,4%.

A continuación, en la figura 1, se muestra la distribución espacial de cada actividad en la situación base, y la que resulta del escenario óptimo (escenario 6).

Figura 1.- Distribución espacial de superficies por actividad, en situación base y escenario óptimo





De las figuras se pueden apreciar condiciones radicales, y muchas veces utópicas, desde el punto de vista de sistema urbano ya desarrollado. Pero nuevamente es necesario tener presente que cualquier otra condición reduciría el óptimo logrado (es la mejor situación para reducir el consumo eléctrico).

Aclarado lo anterior, resultan interesantes de analizar algunas situaciones, como por ejemplo:

- La actividad industrial encuentra su localización óptima principalmente en el borde costero, influenciada claramente por las condiciones meteorológicas de dicha zona (variable incluida en la calibración de los modelos de consumo). Esto genera el inmediato conflicto con el uso turístico, y/o con criterios ambientales (no considerados en este análisis).
- Tanto las actividades de comercio, hotelería, y servicios encuentran sus óptimos en la zona del Vallès, lo que de alguna forma puede afirmar el beneficio energético de una política de subcentros de equipamientos en dicha zona.
- Tanto la actividad de educación, como la sanitaria, y la financiera, logran su óptimo en los municipios contiguos a Barcelona, lo que no deja de ser factible en una política de potenciamiento de la periferia continua del núcleo principal.
- La residencia mantiene su mismo patrón locacional, sin olvidar que su consumo aumenta en el escenario óptimo.

Consideraciones finales

El trabajo cumplió con los objetivos planteados, a pesar de la problemática matemáticas de los modelos utilizados.

Los resultados globales son indicadores de la máxima eficiencia en el consumo eléctrico que podría lograrse con el reordenamiento (radical) de actividades en la RMB.

Los resultados pueden ser vistos como indicativos para ciertas actividades, con el objeto de poner en discusión el beneficio energético (eléctrico) de la generación de cierto tipo de subcentros y/o centros periféricos en el sistema urbano de la RMB.

La eficiencia en el consumo eléctrico rompe la lógica de coexistencia espacial de actividades del sistema urbano, lo que por simetría induce a pensar que la riqueza urbana implica irremediamente altos consumos eléctricos, los que se deben enfrentar con un enfoque más bien de racionalización, y ya no una minimización.....es un costo inherente a la ciudad, y por ende necesario.